

桥梁工程

土

木

工

程

系

列

教

材

- 主 编 罗旗帜
- 副主编 李新平
- 主 审 姚玲森

华南理工大学出版社

土木工程系列教材

桥梁工程

主 编 罗旗帜
副主编 李新平
主 审 姚玲森



华南理工大学出版社
·广州·

内 容 提 要

本书是土木工程专业的专业课教材,共分5篇20章。全书系统介绍了梁式桥、拱式桥上部结构和墩台的构造原理、计算理论、计算方法以及施工方法,也简要介绍了大跨度桥梁的构造、设计和施工要点。

本书亦可供有关专业人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程/罗旗帜主编,李新平副主编. —广州:华南理工大学出版社,2006.2
(土木工程系列教材)
ISBN 7-5623-2298-8

I. 桥… II. ①罗…②李… III. 桥梁工程-高等学校-教材 IV. U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 023007 号

总 发 行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail:scutcl3@scut.edu.cn

<http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑:赖淑华 林炳清

印 刷 者:湛江日报社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:27.75 字数:676 千

版 次:2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:42.50 元

版权所有 盗版必究

编辑委员会

顾问:

- 容柏生 (工程院院士、设计大师,广东省建筑设计研究院总工程师、高工)
何镜堂 (工程院院士、设计大师,华南理工大学教授、博导)
方秦汉 (工程院院士,华中科技大学教授、博导)
曾庆元 (工程院院士,长沙铁道学院教授、博导)
陈宗弼 (设计大师、高工,广东省建筑设计研究院副总工程师)
陈家辉 (高工,广东省建筑工程总公司总工程师)
江见鲸 (清华大学教授、博导,全国土木工程专业教学指导委员会副主任)
蒋永生 (东南大学教授、博导,全国土木工程专业教学指导委员会副主任)
沈蒲生 (湖南大学教授、博导,全国土木工程专业教学指导委员会委员)
钟善桐 (哈尔滨工业大学教授、博导)
吴仁培 (华南理工大学教授)
姚玲森 (同济大学教授)
秦 荣 (广西大学教授、博导)
叶国铮 (广州大学教授)
卢 谦 (清华大学教授)

主任:蔡 健

副主任:卫 军 张学文

委员:(以姓氏笔划为序)

于 布	文鸿雁	王元汉	王仕统	王 勇	王祖华
邓志恒	叶伟年	叶作楷	刘玉珠	李汝庚	李丽娟
李惠强	杨小平	杨昭茂	杨 锐	张中权	张 原
吴瑞麟	陈存恩	陈雅福	陈超核	罗旗帜	周 云
金仁和	金康宁	资建民	徐礼华	梁启智	梁昌俊
覃 辉	谭宇胜	裴 刚	熊光晶		

策划编辑:赖淑华 杨昭茂

项目执行:赖淑华

出版说明

为了适应高等学校专业调整后教学改革的需要,我社在华南理工大学土木工程系的协助下,组织出版这套适合大土木专业本科使用的“土木工程系列教材”。本系列教材按教育部颁布的专业目录中土木工程专业课程设置要求编写,以土木工程专业指导委员会 1999 年 10 月定稿的教学大纲为依据,立足华南,面向全国。整套书的编写讲求完整性和系统性,相关课程的内容经过充分的讨论,在此基础上进行了整合和优化,力求做到课程内容完整、信息量大。在参编作者的选择上尽量考虑中南地区的区域特色,也充分考虑了大土木专业的特点,以求本系列教材真正适合大土木专业的教学要求。

首批出版书目如下:

- 《土木工程教材》(陈雅福主编)
- 《土木工程测量》(刘玉珠主编)
- 《土力学》(杨小平主编)
- 《水力学》(于布主编)
- 《混凝土结构理论》(蔡健主编)
- 《混凝土结构设计》(王祖华主编)
- 《钢结构基本原理》(王仕统主编)
- 《钢结构设计》(王仕统主编)
- 《砌体结构》(卫军主编)
- 《土木工程荷载及设计方法》(张学文主编)
- 《高层建筑结构设计》(梁启智主编)
- 《土木工程施工》(叶作楷主编)
- 《土木工程项目管理》(王幼松主编)
- 《土木工程概预算》(张原主编)
- 《建筑结构选型》(张学文主编)
- 《钢-混凝土组合结构》(蔡健主编)
- 《基础工程》(杨小平主编)
- 《桥梁工程》(罗旗帜主编)
- 《道路勘察设计》(吴瑞麟主编)
- 《路基路面工程》(资建民主编)
- 《房屋建筑学》(裴刚 沈粤编著)
- 《土木工程防灾减灾学》(周云主编)
- 《有限元法基础与程序设计》(王元汉主编)
- 《结构分析的计算机方法》(王勇主编)
- 《国际工程合同管理》(李惠强主编)

首批教材侧重于专业技术基础课程,以后将在专业课程上加以拓展。

华南理工大学出版社

2001 年 2 月

前 言

“桥梁工程”是土木工程专业的一门专业课。本教材是根据土木工程专业本科培养方案以及土木工程专业教材编审委员会审定的《桥梁工程》编写大纲编写的。学生在学完“结构力学”、“土木工程荷载及设计方法”、“混凝土结构设计原理”、“砌体结构”等必修专业基础课的基础上,通过本课程的学习,深入掌握桥梁工程专业技能,具体包括:了解桥梁工程规划、设计、计算的基本知识;掌握常用桥梁的设计构造原理以及中、小型桥梁的计算理论和方法;熟悉有关施工方面的知识;能运用已学知识,初步具备解决较复杂桥梁问题的能力。

本教材是结合最新修订的 JTG B01—2003《公路工程技术标准》、JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》、JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》和 GB 50139—2004《内河通航标准》编写。为了使学生加深对桥梁知识的理解,特在每章后面附有思考题。同时,在讲授桥梁类型和构造时,配有系列电视教材光盘一个。本教材注重原理和概念的阐述,具体计算过程可在课程设计或毕业设计中学习掌握。

本教材共分 5 篇 20 章。第 1 篇是总论。第 1 章概述,主要介绍桥梁建筑发展的动因和国内外桥梁的发展概况、桥梁的组成和分类,重点阐述了桥梁发展与生产力、材料工业、科学技术发展的关系。第 2 章桥梁的总体规划与设计,主要介绍桥梁设计原则、程序和规划设计,并简要阐述了桥梁的造型与美学。第 3 章桥面布置与构造,主要介绍桥梁共有的桥面构造,并重点介绍了目前广泛使用的几种伸缩构造和连续桥面构造。根据土木工程系列教材内容的整合、优化原则,将桥梁工程中的设计荷载内容归入了《土木工程荷载与设计方法》,本教材不作叙述,避免不必要的重复。

第 2 篇为钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥。第 4 章梁式桥设计与构造,主要介绍梁式桥各种体系的受力特点、梁式桥的立面和横断面设计、配筋设计原则和构造、支座构造和墩台构造。第 5 章简支梁桥的计算是本教材讲授的重点之一,主要介绍行车道板计算、荷载横向分布系数计算、主梁和横隔梁内力计算、支座和墩台计算。第 6 章连续体系梁桥的计算,主要介绍超静定预应力混凝土桥梁由预应力、混凝土徐变收缩、温度、基础沉降引起的次内力计算。同时,简单介绍箱形截面梁的剪力滞、扭转、畸变和局部横向弯曲。第 7 章梁式桥墩台的计算,主要介绍重力式墩台、桩柱式墩台、柔性墩的计算要点。

第 3 篇为拱桥。第 8 章概述,主要介绍拱桥的基本特点及其适用范围,拱桥的组成及主要类型。第 9 章拱桥的构造,主要介绍拱桥主拱圈与拱上建筑的构造、拱桥墩台构造。第 10 章拱桥的设计,主要介绍拱桥总体规划和拱轴线型的选择等。第 11 章拱桥的内力计算是本教材讲授的另一个重点,主要介绍拱桥上部结构(主拱圈与拱上建筑)和拱桥墩台的计算原理和方法,并简要介绍圆弧无铰拱计算要点和拱桥连拱实用计算问题。

第 4 篇为其他体系桥梁。主要介绍刚架桥、悬索桥(吊桥)、斜拉桥的构造特点和设计计算要点,以便扩大学生的知识面,使学生能结合运用先修课程的知识,初步具备处理这类桥梁结构问题的能力。

第 5 篇为桥梁的施工。主要介绍桥梁整体施工法、悬臂施工法、顶推施工法、缆索吊装

施工法、转体施工法等。桥梁施工是一个复杂和实践性很强的环节,应引导学生从课外阅读和生产实践中去充实感性知识。

考虑到学生对桥梁工程知识掌握的全面性与系统性要求,本教材内容较多,在教学中可根据实际情况采取重点讲授和学生自学的方法实施教学。教材中的第6章按土木工程专业课群组方向选择讲授,对于建筑工程或水利工程方向学生以自学为主,可不讲授。第5篇桥梁的施工内容可以结合现场参观和生产实习等教学实践环节讲授。

本教材第1、2、3章由佛山科学技术学院罗旗帜、李丽芬编写;第4、5、6、7章由华南理工大学李新平编写;第8、9、10、11章由佛山科学技术学院刘喜元编写;第12、13、14章由华中科技大学张海龙编写;第15、16、17、18、19、20章由五邑大学袁国清编写。全书由罗旗帜主编,李新平副主编,同济大学姚玲森主审。

由于编写者水平有限,难免会有不当甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2005年7月

目 录

第 1 篇 总 论

第 1 章 概述	(1)
1.1 桥梁建筑发展的动因和国内外桥梁发展概况	(1)
1.2 桥梁的组成和分类	(18)
第 2 章 桥梁的总体规划与设计	(28)
2.1 桥梁设计的基本原则	(28)
2.2 桥梁设计的基本程序	(29)
2.3 桥梁设计的基本资料	(29)
2.4 桥梁纵、横断面设计及平面布置	(31)
2.5 桥梁的造型与美学	(36)
2.6 桥梁设计的方案比较	(37)
第 3 章 桥面布置与构造	(40)
3.1 桥面组成与布置	(40)
3.2 桥面铺装	(42)
3.3 桥面防水排水设施	(44)
3.4 桥面伸缩缝	(47)
3.5 连续桥面构造	(52)
3.6 人行道、栏杆、防撞护栏与照明设施	(53)

第 2 篇 钢筋混凝土和预应力混凝土梁式桥

第 4 章 梁式桥设计与构造	(60)
4.1 梁式桥体系与受力特点	(60)
4.2 梁式桥立面布置	(62)
4.3 横截面设计	(67)
4.4 配筋设计和构造特点	(74)
4.5 其他构造	(83)
4.6 梁式桥的支座	(88)
4.7 梁式桥的墩台	(94)
第 5 章 简支梁桥的计算	(107)
5.1 概述	(107)
5.2 行车道板的计算	(107)
5.3 荷载横向分布计算	(119)

5.4	主梁内力计算	(155)
5.5	横隔梁内力计算	(162)
5.6	挠度、预拱度的计算	(165)
5.7	支座的计算	(168)
第6章	连续体系梁桥的计算	(174)
6.1	连续体系梁桥的内力计算	(174)
6.2	预加力引起的次内力	(176)
6.3	徐变、收缩引起的次内力	(184)
6.4	基础不均匀沉降引起的次内力	(194)
6.5	温度应力计算	(195)
6.6	箱形截面梁的受力分析	(200)
6.7	牛腿的计算	(211)
6.8	悬臂施工的挠度控制与预拱度设置	(213)
第7章	梁式桥墩台的计算	(219)
7.1	最不利作用效应组合	(219)
7.2	重力式墩台的计算要点	(221)
7.3	桩柱式墩台的计算要点	(225)
7.4	柔性墩的计算要点	(226)
7.5	其他类型墩台的计算要点	(230)
7.6	桩基承台的计算要求	(233)

第3篇 拱 桥

第8章	概述	(239)
8.1	拱桥的主要特点	(239)
8.2	拱桥的组成及主要类型	(240)
第9章	拱桥的构造	(247)
9.1	主拱圈的构造	(247)
9.2	拱上建筑构造	(260)
9.3	其他细部构造	(265)
9.4	拱桥墩台	(269)
第10章	拱桥的设计	(275)
10.1	拱桥的总体布置	(275)
10.2	拱轴系数的选择和拱上建筑的布置	(277)
10.3	拱圈截面变化规律和截面尺寸的拟定	(279)
第11章	拱桥的内力计算	(287)
11.1	拱上建筑的联合作用及横向整体性	(287)
11.2	悬链线拱的恒载压力线及拱的弹性中心	(288)
11.3	恒载作用下拱的内力计算	(298)
11.4	活载作用下拱的内力计算	(302)

11.5	裸拱内力计算	(311)
11.6	温度变化、混凝土收缩和拱脚变位的内力计算	(312)
11.7	拱圈强度及稳定性验算	(316)
11.8	拱圈应力调整	(321)
11.9	组合截面的计算特点	(324)
11.10	圆弧无铰拱计算要点	(325)
11.11	连拱实用计算简介	(327)
11.12	拱桥墩台计算	(338)

第 4 篇 其他体系桥梁

第 12 章	刚架桥	(339)
12.1	一般刚架桥	(339)
12.2	T 型刚构桥	(341)
12.3	连续刚构桥	(343)
第 13 章	悬索桥	(347)
13.1	一般构造	(347)
13.2	悬索桥的结构形式	(348)
13.3	悬索桥的设计	(351)
13.4	悬索桥的计算分析理论	(355)
13.5	悬索桥实例	(357)
第 14 章	斜拉桥	(359)
14.1	斜拉桥的发展及分类	(359)
14.2	斜拉桥的一般布置	(360)
14.3	斜拉桥的构造与设计	(363)
14.4	斜拉桥的分析与计算	(366)
14.5	斜拉桥的防护与疲劳	(367)
14.6	斜拉桥实例	(369)

第 5 篇 桥梁的施工

第 15 章	概述	(371)
15.1	桥梁的施工特点	(371)
15.2	桥梁施工的主要方法	(372)
第 16 章	整体施工法	(374)
16.1	就地浇筑施工	(374)
16.2	预制装配施工	(382)
16.3	移动模架逐孔施工法	(388)
16.4	整孔架设施工	(390)
第 17 章	悬臂施工法	(392)
17.1	概述	(392)

17.2	悬臂拼装法施工	(394)
17.3	悬臂浇筑法施工	(397)
17.4	拱桥的悬臂法施工	(406)
第 18 章	顶推施工法	(407)
18.1	概述	(407)
18.2	顶推施工的方法	(408)
18.3	顶推施工中的几个问题	(411)
第 19 章	缆索吊装施工	(414)
19.1	概述	(414)
19.2	缆索吊装设备	(414)
19.3	拱肋(箱)吊运过程中的内力计算	(417)
19.4	施工加载程序设计	(419)
第 20 章	转体施工法	(425)
20.1	概述	(425)
20.2	钢管拱肋竖转法施工	(426)
20.3	有平衡重平面转体施工	(427)
20.4	无平衡重平面转体施工	(429)
参考文献		(432)

第 1 篇 总 论

第 1 章 概 述

1.1 桥梁建筑发展的动因和国内外桥梁发展概况

1.1.1 桥梁建筑发展的动因

桥梁是一种为全社会服务的公益性建筑,它与人类社会的发展繁荣和人们生产生活的便利息息相关。桥梁建筑既是人类认识自然和改造自然的产物,又是人类各个历史阶段文明发展的结晶。桥梁建筑发展的动因与人类社会生产力、材料工业、科学技术等的发展密切相关。

1.1.1.1 社会生产力发展是桥梁建筑发展的直接动力

桥梁建筑的产生和发展总是与生产力发展水平相适应,与社会需要密切相关,并不能脱离各个历史阶段的社会政治、经济、军事、文化、科学等条件。所以,桥梁的发展也就是生产力发展的写照。

追根溯源,人类共同经历的第一个社会形态是原始社会。原始社会的生产力十分低下,人们使用简陋的石器工具与大自然斗争,求取生存。在原始人类尚不能建造桥梁的时候,往往是利用天然倒下来的树木、自然界内外引力作用而塑造的石梁或石拱、溪涧冲流下来的石块或森林里攀缠的藤萝以越过水道和峡谷而克服各种跨越障碍。到了原始人类已经能够聚族而居,生产资料原始公有的时候,人们便借助天然的独木桥、藤索桥和天然的石梁、石拱跨越河流和山谷而扩大他们的活动范围。因此,古人最早是利用天然桥克服障碍而认识到桥梁的作用。所以,最早的桥梁是人类在生活和劳动中认识自然,而在大自然的“洗礼”中产生的,人类也就是从这天然桥中得到了造桥的启示。

人类历史上的第一个阶级社会为奴隶社会。到了奴隶制社会,农业、手工业和商业已具有相当的规模,城市宫殿、宗庙、防御工程逐渐发展起来,产品流通、人群往来、军事行动等都相当频繁。社会的主要生产工具已由金属代替了石头,青铜制作的斧、刀、锯、锤、铲等工具已普遍使用,并有专门的奴隶从事车、舟的制造。奴隶社会生产力虽然相当低下,但比起原

始社会已有了巨大的进步,人们有必要又有可能建造相当牢固的木桥和石桥,以适应经济、政治、军事等的需要。铁器的使用,使石桥从有墩无梁的墩步开始发展到在石墩上搁置石梁,以及叠涩出梁;木桥从独木桥发展到有承托式的翘式桥和有斜木支撑的斜撑桥;各种舟的制造和运用,为搭建浮桥提供了基础,古代在难以建造墩桥的大江大河上最先建造的是浮桥;随着编织技术的进步,在山区悬崖深谷、水流湍急的两岸,搭建了用天然的藤索编织而成的藤网桥。从奴隶社会进入封建社会时期,虽然科学思想受到愚昧而粗暴的蹂躏,但生产力的发展,社会和生活的需要,仍然推动着桥梁建筑的发展。劳动人民根据他们活动范围的自然条件和运输工具,因地制宜,就地取材,不拘一格地修建了许多桥梁。在物资运输依赖骡马大车、平推板车的地区,修建了许多平坦宏伟的石拱桥和石梁桥;在河流纵横、湖沼棋布、运输以舟船为主的地区,遍布着驼峰隆起的石拱桥;在峰峦层叠、谷深崖陡,难以砌筑桥墩的地区,修建了藤索桥、竹芭桥、竹吊桥等。因此,人类历史从原始社会到 16 世纪中叶,经历了 300 多万年的历史,古代桥梁不仅是记载着人类克服艰险、战胜自然、发展进步的鉴证丰碑,而且也是古代生产力发展客观要求的必然产物。

历史进入到 14、15 世纪后,欧洲资本主义萌芽已经在封建国家内部生长起来,社会生产力的迅速发展,加快了这些国家由手工业生产方式向工场工业生产方式过渡的步伐。到了 18 世纪 60 年代,英国开始了第一次工业革命,蒸汽机的广泛使用,推动了各个工业部门的大工业生产。纺织、冶炼、采煤蓬勃兴起,加速了机器业的发展,接着又引起材料、能源等部门的革命,而这些部门的产业革命导致了社会生产过程中交通运输工具的变革。因此,从 18 世纪末期起,运输技术的改革进入了全面发展的重要阶段,人们一方面发展水上运输,另一方面又推进陆上交通的发展。19 世纪初,轮船的发明标志着蒸汽动力船取代帆船的新时代开始。船的载重吨位的逐渐增加,促使船身加大加宽,航运部门对桥梁建筑的跨径和净空高度提出了新的要求。与此同时,英国人发明了蒸汽机火车头,1825 年世界上第一条铁路在英国诞生,标志着铁路时代的到来。火车的发明,铁路的兴起,大吨位交通工具的出现,迫切地需要改进旧的落后的交通工具和载体,尤其对桥梁建筑的承载能力提出了更高的要求。因此,人类史上的第一次工业革命,促进了生产力的飞速发展,同时也推动了桥梁建筑的革新,标志着近代桥梁革命的开始。到了 19 世纪 70 年代,进入了第二次工业革命,“蒸汽时代”被“电气时代”所取代。1826 年英国人发明了内燃引擎汽车后,1885 年德国人又发明了以汽油为动力的汽车。19 世纪末和 20 世纪初,汽车工业得到了迅速发展,同时也推动了近代桥梁的发展。到了 20 世纪 30 年代后,进入了第三次工业革命,整个世界发生了巨大的变化。交通运输既是国民经济赖以发展的基础结构,又是国际贸易和国际交往的纽带。自从 1932 年第一条高速公路在德国诞生后,发达国家陆续建造了大量高速公路,促进了公路网建设,新兴的公路运输逐渐成长为独立的运输体系。交通运输的发展对桥梁建筑提出了更高和更新的要求,从而推动了现代桥梁的发展。

20 世纪 70 年代以后,世界经济发展趋于国际化、全球化,交通运输对工农业生产、人民生活 and 国防建设的空间活动范围、活动力度、活动速度等显得至关重要。随着社会经济发展和人们物质生活水平的提高,对桥梁功能,包括桥梁的跨越能力、通行能力、承载能力等要求越来越高。随着人们精神生活的日益丰富,对桥梁建筑的美学要求也成为一种更为普遍的崇尚。桥型方案选择时,要求结构功能和造型艺术统一,桥梁功能、技术、经济、美观融为一体。随着交通可持续发展理念的建立,人们越来越重视桥梁的噪音、震动、污染等方面的限

制。因此,为了避免修建深水桥墩,并利于通航,桥梁跨径做得越来越大;为了增加通行能力,并提高车速,桥面越来越宽;为了改善风载下的动力性能,并使桥型美观,梁型越来越扁;为了减少圬工,少占桥下净空,桥墩越来越细;为了适应跨海工程,在结构上研究适合应用于更大跨度的结构形式。所以,当代桥梁的发展,已经远远地超过它自身狭窄的意义,它是一个国家物质文明、综合国力的标志,是生产力高度发展的重要象征。

1.1.1.2 材料工业发展是桥梁建筑发展的物质基础

人类社会发展的历史表明,材料是人类生存和发展、征服自然和改造自然的物质基础,也是人类社会现代文明的重要支柱。材料技术的每一次重大突破,都引起生产技术的革命,大大加速社会发展的进程,并给社会生产和人们生活带来巨大的变化。人类历史经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代、高分子材料时代。桥梁建筑的发展和进步与各个时期材料工业的革新和应用密切相关,材料科学的发展给桥梁建筑带来了强大的生命力。

在遥远的原始社会时期,人类最早利用的材料是天然的石、木、藤、竹等,这些材料是大自然赋予人类的最早的建筑材料,可以说是取之不尽用之不竭。所以,人类最初能掌握建桥的材料是大自然提供的。古代桥梁建筑是人们就地取材,凭借体力或简单的工具建造石桥、木桥和藤竹桥。木材或藤竹虽然能抗拉,但它的强度很低,又易腐易燃、易虫蛀,使用寿命短;石料虽然抗压能力强,但它的抗拉、抗弯能力较低,适用范围窄。天然材料性质的局限性,无疑限制了桥梁跨径的发展和承载能力的提高,不能满足生产力发展的新要求。

人类掌握冶炼金属技术之后,摆脱了受自然材料的束缚,能够从自然界提取有用的材料。在石器时代之后的青铜器时代,青铜没有用于造桥。青铜器以后为铁器时代,由于铁矿比较丰富,冶炼也比较容易,铁的应用促进了生产,也用于桥梁建筑。人类冶炼历史悠久,最初大量生产的是铸铁,1779年英国建造的雪纹桥是世界上第一座铸铁桥,随后在德国、美国陆续出现了铸铁拱桥。随着冶炼技术的发展,18世纪后半叶到19世纪初发明了锻铁炉,使锻铁代替了铸铁,英国相继出现了锻铁箱形梁桥,同时在欧洲各地发展了小跨径锻铁桁架梁桥。因此,铁器时代的到来,突破了石、木、藤、竹材料的限制,给近代桥梁发展奠定了物质基础。在18世纪下半叶至19世纪下半叶,世界上修建了大量的铁桥,并进入了铁桥繁盛时期,可称为铁桥时代。19世纪后开始实现以焦炭代替木炭炼铁的一系列新技术革命,推动了冶金工业的迅速发展,发明了炼钢技术。1855年英国人发明了酸性转炉炼钢法,紧接着发明了西门马厂平炉炼钢法,高炉、转炉、平炉的生产体系初步形成,开始了大规模钢铁生产的新时代。钢铁市场的扩大,给桥梁建筑带来了新的活力。1874年美国建造了第一座公路、铁路两用钢桥(偌易斯桥)后,各国相继建造了许多不同结构形式的钢桥梁,出现了桁架、刚架、箱梁、悬索体系等新型的桥梁。20世纪30年代掀起了第一个大跨悬索桥建设高潮,美国旧金山金门大桥(悬索桥,跨度达1280m,1937年)被认为是当时的撼世奇迹,在相当长的时间内居于世界桥梁之首。20世纪初,钢拱桥在西方工业社会兴起,30年代就创下了拱桥跨度纪录(美国奇尔文科公路桥,跨度504m;澳大利亚悉尼港公铁两用桥,跨度503m),并于50年代达到建设高峰。由于钢铁材料强度高,适应性强,装配化程度高,架设速度快,在桥梁建筑上得到了广泛的应用,19世纪下半叶至20世纪中叶进入了钢桥时期。因此,钢铁材料的应用,一方面使人们重新认识了建桥材料,另一方面推动了桥梁自身的完善和发展,标志着材料的变革给桥梁工程带来的巨大飞跃。

人类几千年前已使用煅烧过的石灰或石膏,到了19世纪初,英国人制成了“波特兰”水

泥,接着法国(1840年)、德国(1858年)都先后建起了水泥厂。水泥的使用,使人们得到了一种良好的胶结材料,从而能把砖或石粘结在一起,形成混凝土结构,即水泥从原来只作胶结材料变为结构的主体。19世纪50年代,人们对混凝土性质有了比较多的了解,不久又进一步发展到把钢筋和混凝土结合起来,得到了钢筋混凝土这一既抗压、又抗拉的建筑材料。钢筋和水泥的综合应用突破了几千年来受到的土木砖石的限制。钢筋混凝土具有优良的性能,它让两种不同的材料各尽所能、扬长避短,与钢相比经济,它的出现给桥梁建筑提供了新的材料。近代早期出现了钢筋混凝土概念的萌芽,它导致了人们对建桥材料的重新认识,无疑为钢筋混凝土的发展奠定了基础。将钢筋混凝土材料第一个付诸实践的是法国园艺家茅耶,他在1867年至1873年间制造了钢筋混凝土花盆、水槽、板等结构,随后于1875年至1877年在卡累莱特的城前公园架起了第一座供人行走的钢筋混凝土桥。二次大战期间,由于战争对钢材的消耗和工业发展需要大量的钢材,所以钢材来源困难,满足不了大规模的建桥要求,建桥材料重点摆在钢筋混凝土的发展上。但钢筋混凝土致命的缺点一方面是自重过大,不适应于大跨径桥梁的发展;另一方面混凝土早期开裂致使钢筋锈蚀毁坏。1928年,法国工程师弗兰西涅第一次把预应力的概念成功地运用到桥梁结构中去,这恰恰克服了钢筋混凝土的不足之处,为混凝土桥梁发展开辟了新纪元。预应力混凝土技术的出现与应用,不仅带动了中小跨径桥梁的迅猛发展,也促成了大跨度桥梁的发展。同时也衍生出许多新的施工方法和工艺,显示出很强的竞争力,成为20世纪最重要的建桥材料。

纵观桥梁建筑的发展,材料的每一次变革都会给桥梁工程带来巨大的进步。19世纪钢材在欧洲的出现,实现了桥梁建筑的第一次飞跃,桥梁工程获得了空前的发展,桥梁结构形式及规模有了突破。20世纪初叶,钢筋混凝土的广泛应用,随后预应力混凝土的诞生,实现了桥梁建筑的第二次飞跃,开始了混凝土桥梁结构的时代。

1.1.1.3 力学理论发展是桥梁建筑发展的重要保证

科学技术是推动历史前进的有力杠杆,科技文明是人类现代文明的基石。桥梁建筑主要是以力学理论作为科学依据,它的结构设计和演变依赖于数学、力学的成果,同时桥梁的发展又促进了力学理论的发展。

自然界在地心引力作用下,物体基本上受到拉力、压力、弯曲等3种静力作用。古代人们虽然对力学概念不很清楚,但梁、拱和吊桥已表现了上述3种力的作用。在科学不发达的古代,生产力水平低,人们对自然界的认识主要依靠不充分的观察事实和简单的逻辑推理,直观地、笼统地把握自然现象的一般性,因此古代桥梁一般按“经验法则”建造。最早的木梁桥,因材料强度不够,不宜做长跨桥梁,于是人们就在墩柱上搭架,用木梁横直排叠、层层挑出以承托短梁,增大了跨度,成为翘式桥,也就是现代伸臂桥型的萌芽。后来由于伸臂挑出的层数太多,产生墩身不稳定的矛盾,便在短梁和墩体之间用斜木支撑,这实质上已构成了现代斜腿刚架桥的雏形。古代拱桥中的叠梁木拱,充分利用木材纵向抗压强度大的特点,用一根根短木斜叠,把桥面垂直荷载顺短木斜传至桥身和拱脚,体现了近代力学中的力可传递性原理。我国古代拱桥的矢跨比(f/l),隋代赵州桥不足0.2,北宋汴京虹桥约0.23,稍晚的小商桥为0.25,金代的卢沟桥是0.29,与近代力学经过复杂计算所得的最佳值十分吻合。总之,古代桥梁建筑尽管凭借“经验法则”建造,却是人类科技文化发展的一朵奇葩。

始于意大利的欧洲文艺复兴运动是人类历史上一次最伟大的思想解放运动,孕育诞生了近代科学体系。随后的资产阶级革命和工业革命进一步解放了生产力,推动了科学技术

的发展,建立和充实了近代科学体系,同时也促进了近代自然科学的产生和发展。到了牛顿时代,虽然经典力学理论已经得到很大发展,但是力学在桥梁工程中的应用还处于启蒙阶段。随着力学理论的蓬勃发展和工程技术实际问题的提出,17世纪中叶开始对材料力学进行研究,18世纪以后技术和科学之间的接触开始增加与扩大,并不断地改变着理论与工程在旧时期孤立发展的面貌。随着材料力学的发展,人们用科学方法揭示出隐藏在材料和结构中的内力性质,从而可以预先计算出构件截面中将产生的应力,以便能够做出比较合理的工程设计。因此,18世纪以后桥梁建筑开始从数学和力学上进行分析,并建立了拱的静力学理论,同时对拱桥的认识加深,并以力学原理解释了受压拱桥的合理拱轴线问题。19世纪以后,结构力学的诞生和弹性理论的形成,把桥梁设计从经验法则年代推入了科学的年代。桥梁结构的静力计算理论得到了很大的发展,1864年产生了根据力学理论计算的伸臂梁,不久,创立了计算连续梁的弯矩方程,建立了工程中需要的许多计算理论和方法。总之,19世纪至20世纪初,力学理论的发展为桥梁建筑发展输入了新的血液,人们从力学的角度,重新认识了桥梁结构的受力性能,促进了连续梁桥、桁架桥、拱桥、悬臂梁桥等的迅速发展,使桥梁结构形式发生了深刻的变化。

尽管19世纪至20世纪初桥梁的静力计算得到了长足的发展,但对桥梁的动力计算理论、塑性理论仍不成熟。因此,早期修建的吊桥和斜拉桥破损及坠桥事故频繁,如1809年美国费城建成的休吉河链杆悬吊桥,两年后在畜群过桥时倒塌,重建以后1816年又被积雪压垮。1824年德国建成的尼恩堡斜拉桥,1825年人群过桥时斜杆断裂坠毁;1940年美国塔科玛悬索桥在大风中振动时因扭转震动破坏。桥梁不断发生事故,曾引起世界震惊,促使人们高度重视空气动力学、薄壁结构理论、振动理论、断裂力学、极限状态理论等的研究。20世纪50年代后,应用力学的出现,进入了力学分析时代,人们不仅从静力学方面分析桥梁的受力性能,而且开展动力学研究。空气动力稳定性成为一个大量研究的课题,风洞和振动试验成为设计师的研究工具。对于大跨径桥梁,一方面考虑了空气动力的影响,并开展了桥梁的风洞试验;另一方面又考虑列车震动、地震力等动力荷载的影响。在材料方面重点研究混凝土的力学性能和混凝土结构的可靠度理论,以求达到更加经济合理,又能保证安全。20世纪50年代的电子计算机问世,促进了计算力学的发展,结构计算中的矩阵力法、矩阵位移法、有限元法等为电算提供了高效能的组织形式和计算方法,实现了结构内力分析电子化和结构设计自动化。电子计算机计算技术时代的到来,给复杂的桥梁结构计算提供了强有力的手段,使桥梁设计人员从大量繁琐的计算工作中解放出来。动力学理论和计算力学应用于桥梁工程,标志着桥梁设计理论进入了一个新阶段,促进了桥梁向长大化、轻型化、标准化方向发展。因此,力学理论发展是桥梁结构的科学依据,为桥梁建筑开辟了更广阔的前景。

1.1.2 我国桥梁建筑的成就

我国是有着悠久历史和灿烂文化的文明古国,在桥梁建筑史上也写下了不少光辉灿烂的篇章。我国幅员辽阔,山多河多,自然条件错综复杂,古代桥梁不但数量惊人,而且类型也丰富多彩,成为华夏文化的重要组成部分。

根据史料记载,在距今约三千年的周文王时代,我国就已在宽阔的渭河上架设过大型浮桥。汉唐以后,浮桥的运用日趋普遍。公元35年东汉光武帝时期,在今宜昌和宜都之间,出现了架设在长江上的第一座浮桥;之后,因战事需要,在黄河、长江上曾架设过浮桥不下十余

座,现存最古老的浮桥是位于浙江省临海县的中津桥(今称灵江浮桥)。

近代的大跨径吊桥和斜拉桥也是从古代的藤、竹吊桥发展而来的。几乎在大部分有关桥梁的历史书上,都承认我国是最早有吊桥的国家,迄今至少有三千年的历史。据记载,至唐朝中期,我国就从藤索、竹索发展到用铁链建造吊桥,而西方在 16 世纪才开始建成铁链吊桥,比我国晚了近千年。至今尚保留下来的古代吊桥有四川泸定县的大渡河铁索桥(1706 年)以及都江堰市的安澜竹索桥(1803 年)等。泸定铁索桥跨长约 100m,宽约 2.8m,由 13 条锚固于两岸的铁链组成,是当时世界上最大的铁索桥。安澜桥是世界上最著名的竹索桥,全长 340 余米,桥宽约 3m,分 8 孔,最大跨径约 61m,全桥由细竹篾编成粗 0.167m 的 24 根竹索组成,其中桥面索和扶栏索各半。

古代桥梁所用材料均为大自然赋予人类的天然材料,如树木、藤、石料等,其中石料具有耐久性好、分布广、容易开采加工等优点,因此几千年来修建较多的古代桥梁要推石桥居首。

石梁桥的普及稍后于木梁桥,在秦汉时期我国已广泛修建石梁桥,至唐、宋时鼎盛,涌现出了许多名闻天下的石梁桥。其中最负盛名的是 1053—1059 年在福建泉州建造的万安桥,也称洛阳桥。此桥是世界上现在尚保存着的最长、工程最艰巨的石梁桥,桥长达 800 多米,共 47 孔,位于“波涛汹涌,水深不可测”的海口江面上。此桥以磐石铺遍桥位江底,是近代筏形基础的开端。用养殖海生牡蛎的方法胶固桥基使成整体,更堪称世界一绝。

1240 年建造的福建漳州虎渡桥,也是最令人惊奇的一座梁式石桥(图 1-1)。此桥总长约 335m,某些石梁长达 23.7m,沿宽度用 3 根石梁组成,每根宽 1.7m,高 1.9m,重达 200 多吨,该桥一直保存至今。历史记载,此桥的跨径居当时石梁桥世界之首。根据近代力学对该桥所进行的强度验算,在石梁自重作用下,跨中截面的拉应力已接近花岗石的抗拉极限应力,说明该桥充分发挥了材料的承载能力。在当时条件下,能达到这样的水平,是令人惊叹的。同时这些巨大石梁当时是利用潮水涨落浮运架设的,足见我国古代加工和安装桥梁的技术何等高超。

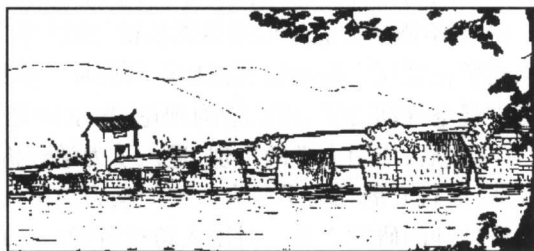


图 1-1 福建漳州虎渡桥

富于民族风格的古代石拱桥技术,无论是结构的精心巧思,还是艺术造型的丰富多姿,长期以来一直驰名中外。我国古代的石拱桥分布很广,数量很多,但历史上最早有明确记载的石拱桥是西晋 282 年在洛阳七里涧上建成的旅人桥,也称七里涧桥。自晋以后,石拱桥得到迅速发展,举世闻名的河北省赵县的赵州桥(又称安济桥),就是我国古代石拱桥的杰出代表(图 1-2)。该桥在隋大业初年(公元 605 年左右)为李春所创建,是一座空腹式的圆弧形石拱桥,净跨 37.02m,宽 9m,拱矢高度 7.23m。在拱圈两肩各设有两个跨度不

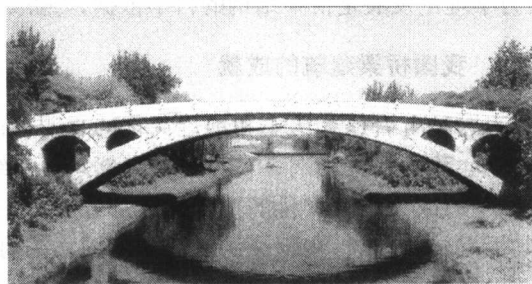


图 1-2 赵州桥(又称安济桥)